



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/19785>

To cite this version :

Juan Camilo GOMEZ ECHEVERRI, Xavier GODOT, Bruno DAILLE-LEFEVRE, Jorge Humberto MORALES ARISTIZABAL, Patrick MARTIN - Prise en compte de la santé-sécurité dans la conception et l'exploitation des systèmes reconfigurables - In: MOSIM, Maroc, 2020 - 13ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM) - 2020

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



PRISE EN COMPTE DE LA SANTE-SECURITE DANS LA CONCEPTION ET L'EXPLOITATION DES SYSTEMES RECONFIGURABLES

Juan Camilo GOMEZ ECHEVERRI¹

juancamilo.gomezecheverri@ensam.eu

Xavier GODOT¹

xavier.godot@ensam.eu

Bruno DAILLE-LEFEVRE²

bruno.daille-lefevre@inrs.fr

Jorge Humberto MORALES ARISTIZABAL

jorge.ma96@hotmail.com

Patrick MARTIN^{1,*}

Patrick.martin@ensam.eu

¹ Laboratoire de Conception Fabrication Commande - Arts et Métiers, Université de Lorraine, 4 rue Augustin Fresnel, 57078 Metz, France

² Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Département Ingénierie des Équipements de Travail, 1 rue du Morvan, 54519 Vandœuvre-Lès-Nancy cedex, France

*Auteur correspondant

RESUME :

Des sauts technologiques significatifs sont induits par la mise en œuvre de l'usine du futur, les interactions entre l'Homme et les équipements de production sont modifiées afin de répondre aux objectifs de réactivité, de contrôlabilité, d'évolution de l'environnement de travail, ceci conduit pour la santé-sécurité au travail à de nouveaux enjeux tout au long du cycle de conception et d'exploitation du système. Afin d'apporter des éléments de réponse à ces enjeux, cet article présente les concepts, méthodes, outils proposés et validés sur un cas d'étude de système de production reconfigurable avec des opérations humaines et robotisées, dans un objectif de prévention intégrée. L'accident est directement associé à la présence simultanée de l'opérateur et de l'objet dangereux au niveau du poste de travail. L'identification de situations dangereuses et donc la prévention nécessite donc d'investiguer l'ordonnancement des tâches, l'identification de paramètres caractéristiques de conception (flux d'énergie, volume d'influence) associés aux risques potentiels, la quantification des risques et leur exploitation afin d'aider le concepteur dans ses activités de conception sûre des situations de travail, à l'aide des outils de traitement des informations (hétérogènes et en interaction) permettant de proposer et de valider des configurations spatiales et temporelles.

MOTS-CLES : industrie 4.0, facteurs humains, conception / innovation, systèmes de production de biens et de services, santé-sécurité, systèmes reconfigurables.

1 INTRODUCTION - PROBLEMATIQUE

De nombreuses études soulignent l'importance dans le paradigme de l'usine du futur, de la prise en compte et de l'intégration de l'Homme dans les systèmes de production (CEE 2012, EFFRA 2019, FIM 2015, FURURPROD 2013, Veltz et Weil 2015). L'usine du futur présente plusieurs angles d'analyse: systèmes de production connectés et adaptatifs, virtualisation, procédés de fabrication avancés, robots et machines automatisés, aspects humains et sociaux. Nous nous intéressons particulièrement aux aspects santé et sécurité au travail liés à la mise en œuvre de nouveaux équipements et à l'organisation de la production. Ceci s'appuie à la fois sur l'analyse des usages et la modélisation des situations de travail pour leur conception et leur exploitation.

Au sein de l'usine du futur les risques fondamentaux pour la santé-sécurité sont ceux identifiés au niveau de la normalisation (AFNOR 2010) par contre leurs occurrences, leurs causes, leurs gravités, dépendent directement du nouveau contexte et des nouvelles conditions et situations de travail en particulier en terme :

- De conception des équipements pour la reconfigurabilité,
- D'interactions Homme-robot et Homme - Homme (transport, assemblage, qualification produit, mise au point...) en cours de production,
- D'utilisation au cours des phases de production, de préparation, de maintenance, de reconfiguration,
- D'organisation de la production ou du poste de travail (pilotage de la production, flux tiré, flux poussé, lean-manufacturing, auto-organisation, marges de manœuvre).

Ce nouveau contexte conduit à un certain d'interrogations à la fois sur les nouveaux éléments à prendre en compte à la fois du point de vue des technologies mise en œuvre (mécanique, automatique, informatique), de l'identification des spécifications, des modélisations (modèles, logiciels) utilisées lors de la conception, du pilotage des équipements, de la planification de la production, de la validation de l'utilisation sûre de l'équipement de travail et de son exploitation.

Afin de répondre à ces questionnements en terme de prévention des accidents du travail, nous avons développé un certain nombre de travaux dont les résultats principaux sont présentés dans cet article. Ils portent à la fois sur les

concepts, les éléments significatifs de qualification et de quantification d'une part et d'autre part sur leur validation sur un exemple de système de production reconfigurable. Plus particulièrement il s'agit d'apporter des modèles et outils en réponse aux questions identifiées et aux exigences antagonistes de santé-sécurité et de performance industrielle :

- Comment spécifier, puis concevoir des îlots de production sécurisés qui présentent des périmètres fonctionnels et d'usages évolutifs et adaptés à leurs usages pour différentes situations de vie (montage, réglage, exploitation, modification, démantèlement...) ?
- Comment protéger les opérateurs dans un environnement en évolution constante (plates-formes autonomes, robots collaboratifs, etc.) ?
- Comment gérer en sécurité les phases de reconfiguration ?
- Quelle est l'impact des robots collaboratifs, des nouvelles interfaces Homme-machine, etc... sur l'activité des opérateurs de production ou de maintenance et sur leurs encadrants ?
- Comment assurer la conduite de la production dans un environnement variable et perturbé: différence entre prescrit et réel, phases transitoires ?
- Comment assurer la réponse simultanée aux objectifs de performances (productivité, flexibilité, qualité) et de santé- sécurité ?

Plus globalement ces travaux se positionnent dans le cadre de la démarche dite de « Prévention intégrée » qui consiste à appliquer au plus tôt des principes de conception sûre à un futur équipement de travail (De Galvez et al, 2017).

2 SYSTEMES ET MACHINES RECONFIGURABLES

Les systèmes et machines reconfigurables ont été étudiés depuis de nombreuses années selon des points de vue technologiques (Koren et al., 1999), (D'Acunto et Martin 2009), organisationnels ou logistiques (Benyoucef 2019). Cette reconfiguration peut être prise en compte au niveau de la machine (modules, outillages...) (fig 1.) ou îlot (machines, routage...) que ce soit au niveau physique, contrôle - commande (automates, réseau de communication) ou pilotage (centralisé, coordonné, auto – organisé). La gamme de fabrication dans un système reconfigurable n'est pas connue a priori. Afin d'assurer la productivité et la réactivité à une demande variable la reconfiguration peut être réalisée au niveau des machines, de l'organisation des postes de travail, des flux, du partage des tâches entre l'Homme et le robot. De plus les machines possèdent des redondances fonctionnelles.

Aussi la gamme est établie juste avant le lancement de la production ou pendant la production. La modélisation de configurations d'îlots de production, de l'organisation spatiale des éléments caractéristiques, des opérations à réaliser et de leur planification, doit permettre de réaliser des scénarii d'exploitation et d'identifier ainsi les risques potentiels en matière de santé-sécurité au niveau de la conception comme de l'exploitation.

Pour ce faire nous avons défini un exemple type de système de production reconfigurable comportant (fig. 2)

comportant à la fois des opérations d'usinage sur machine reconfigurable, de contrôle, d'assemblage, de préparation, de stockage. La production prévue est celle de deux produits A et B composés comme suit :

- pour le produit A de 2 pièces usinées P1i et P2i puis assemblées,

- pour le produit B pièce P3i usinée puis assemblée avec P4i (prise en stock) par vissage.

Les pièces P1i et P2i sont réalisées sur les machines M1 et M2 à broche verticale. La pièce P3i est fabriquée sur M2 reconfigurée en fraiseuse à broche horizontale.

M1 est toujours à broche verticale, par contre M2 passe d'une configuration de broche verticale à broche horizontale.

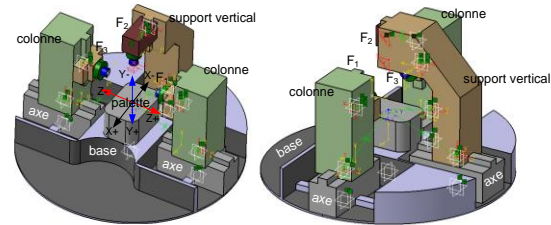


Figure 1: Machine-outil reconfigurable

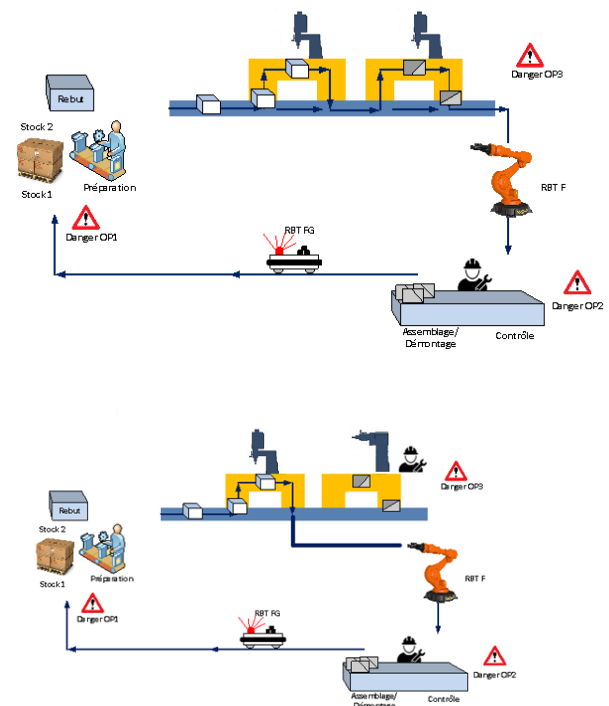


Figure 2: Les deux configurations de l'îlot de fabrication support de l'étude

3 IDENTIFICATION DE SITUATIONS DANGEREUSES

L'accident est directement associé à la présence simultanée de l'opérateur et de l'objet dangereux au niveau du

poste de travail. L'identification de situations dangereuses et donc la prévention nécessite donc d'investiguer:

- l'ordonnancement des tâches;
- l'identification des paramètres de conception caractéristiques liés à la qualification des risques ;
- la quantification des risques et leur exploitation afin d'aider le concepteur dans ses activités de conception sûre des situations de travail.

3.1 Planification

Nous illustrons cet aspect sur notre exemple de système reconfigurable. Le planning des phases d'une production répétitive de produits A et B (fig. 3) met en évidence les séquences potentiellement dangereuses pendant lesquelles les robots (robot à base fixe 6 axes, robot mobile filoguidé) et les opérateurs OP1 et OP2 d'une part, le robot 6 axes et l'opérateur OP3 en phase de reconfiguration de machine d'autre part. Le séquencement des opérations dans le même espace de travail, entre l'opérateur et le robot permet de montrer la prise en compte de la sécurité dans la planification des tâches (principe de séparation dans le temps).

Ainsi la planification en temps réel des tâches réalisées par l'opérateur et l'élément dangereux constitue une première réponse à la réduction des risques.

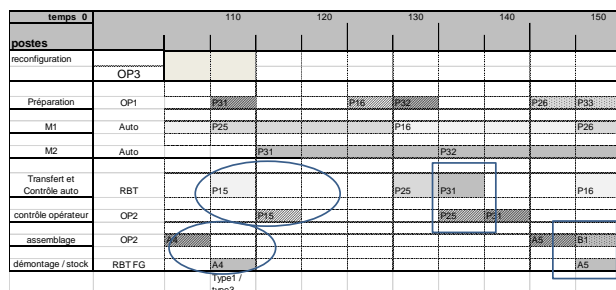


Figure 3 : Planning des opérations montrant des périodes communes ou décalées entre l'opérateur et le robot d'utilisation de l'espace de travail.

4 PARAMETRES SIGNIFICATIFS POUR LA DESCRIPTION DU POSTE DE TRAVAIL

4.1 Définition des éléments constitutants

Afin d'identifier les phénomènes dangereux au plus tôt durant le processus de conception, l'axe choisi a été d'utiliser les paramètres pertinents de conception générés par le concepteur au cours de cette phase.

La figure 4 présente les différents éléments fonctionnels constituant un système de production permettant de définir la composition de l'îlot de production (composé de postes de travail et eux-mêmes de modules fonctionnels et des opérateurs). A chaque module pourront être associés les paramètres significatifs (énergie et volume d'influence) liés aux risques potentiels. Dans ces définitions,

l'opérateur est au même niveau que des modules fonctionnels et peut réaliser la plupart de ces opérations.

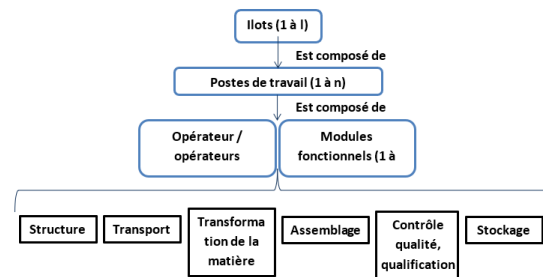


Figure 4 : Typologie des éléments constituant les îlots de production

Chaque module possède des éléments mécaniques, physiques, électroniques ou logiciels assurant des actions physiques, de contrôle / qualification et de décision. L'opérateur possède également les mêmes fonctionnalités. L'interaction, à un instant donné entre les modules et l'opérateur (s), engendre des actions qui peuvent conduire à des phénomènes dangereux. Les risques sont étudiés à deux niveaux : machine (interaction entre modules et opérateurs) et ilot (interaction entre postes de travail et opérateurs). La granulométrie est choisie par le concepteur compte tenu de son objectif (lien organisation, gestion de l'espace, usage, ...), de sa connaissance de l'état de l'ilot de production, de la précision d'analyse recherchée. Elle joue ainsi un rôle déterminant afin de permettre le suivi des phénomènes dangereux et de leur niveau de gravité selon les modifications faites au système de production.

La figure 5 illustre les liens entre ces paramètres de conception et ceux utilisés pour l'analyse des risques ainsi que les différentes étapes permettant de réduire les risques au niveau de la conception comme de l'exploitation.

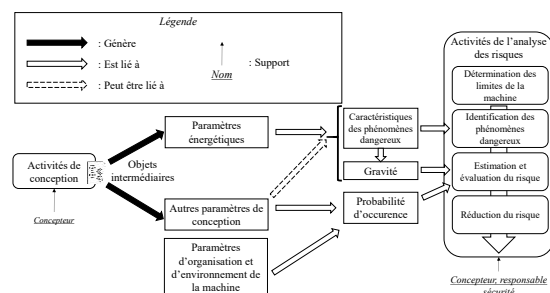


Figure 5 : Liens entre les paramètres de conception et ceux utilisés pour l'estimation-évaluation des risques (De Galvez 2016)

4.2 Identification des énergies mise en oeuvre

L'hypothèse forte de l'approche est que les phénomènes dangereux sont liés à la présence d'énergie. Ainsi la démarche EZID (pour Energy ana-lysis for systematic ha-Zard Identification during Design) a été proposée par (De Galvez et al. 2017). Les paramètres de conception liés à

un flux d'énergie peuvent être répartis en deux familles : les paramètres principaux énergétiques qui caractérisent un flux d'énergie (description technologique de la manière dont ce flux circule dans la machine) et les paramètres complémentaires (forme, matériau, état de surface, trajectoire). En se basant sur les variables généralisées pour plusieurs types d'énergie (Borutsky 2009), et sur l'analyse de normes sur la prévention des accidents (AFNOR 2008, AFNOR 2010), il a été possible de proposer une table des paramètres représentatifs de l'ensemble des énergies généralisées (fig.6),

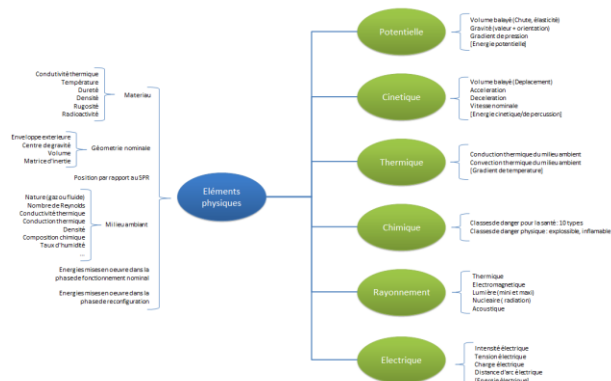


Figure 6 : Paramètres des flux énergétiques généralisés et des paramètres complémentaires (Gomez- Echeverri, 2018)

4.3 Volume d'influence

L'accident est lié à la présence de l'opérateur dans l'espace occupé à un instant donné par un élément dangereux. Cet élément dangereux peut apparaître au niveau de la tâche réalisée (outil coupant, ...) mais aussi potentiellement existant dans la machine et libéré au moment de la tâche d'une façon volontaire ou non (énergie mécanique potentielle, fluide sous pression, polluant, ...). Ainsi nous utilisons le concept de volume d'influence (VI). Il est défini comme l'espace physique où une ou plusieurs propriété(s) des modules peuvent agir. Les paramètres des volumes d'influence ont été définis pour les énergies généralisées identifiées (fig. 6) (Gomez Echeverri 2018). Chaque VI est défini par les propriétés associées aux risques pour la santé – sécurité au travail en terme de type comme de quantification du niveau de risque. Soulignons que le VI de structure est le volume de base pour les autres types de VI, car les caractéristiques permettent de déterminer toutes les autres.

La zone dangereuse (géométrie) est définie par les espaces occupés à chaque étape étudiée (suite d'images statiques) par les zones d'influence des équipements et l'opérateur (modélisation simplifiée).

Nous prenons comme hypothèse que tous les éléments pertinents pour notre analyse peuvent être décrits par la géométrie et ainsi par des modèles CAO spécifiques afin d'illustrer et de valider la démarche. Un exemple de validation pour l'ilot de fabrication support de l'étude est présenté figure 7.

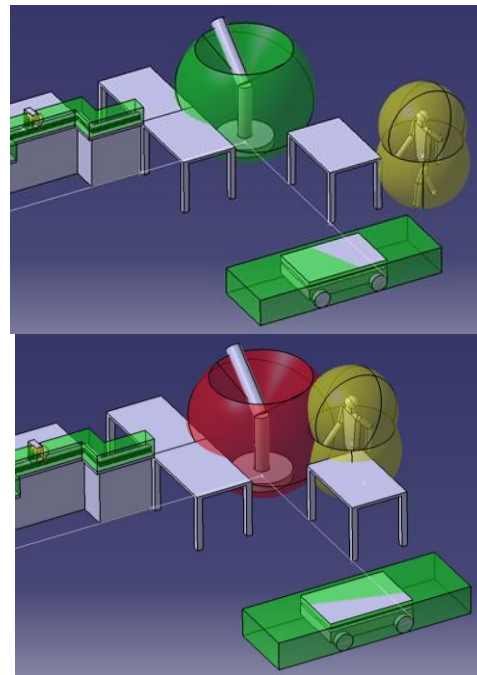


Figure 7 : Modélisation CAO des volumes d'influence

5 QUANTIFICATION DES RISQUES

La simulation géométrique sert à représenter les volumes d'influence correspondant à chaque module présent dans le système de production, il s'agit ensuite de représenter le niveau de gravité associé à chaque volume d'influence, permettant ainsi de connaître les risques potentiels et d'en déduire les mesures de prévention. L'information utile pour le concepteur pour choisir la solution technique à mettre en œuvre se limite au niveau gravité mais ne porte pas ni sur la fréquence ni sur la probabilité.

Cette estimation est réalisée par l'analyse des normes associées (INRS 2017, INRS 2018 a, b, c, INRS 2019, ISO/TS 15066:2016) à chaque type d'énergie identifié. Nous avons pu constater que les informations disponibles sur chaque type de risque ne sont pas les mêmes : sous forme de tableaux à plusieurs paramètres, à trois ou quatre niveaux, associée à une partie du corps.... A partir de ces informations la valeur énergétique maximale à laquelle le travailleur est exposé a été classée sur une échelle de niveau de gravité de 1 à 3 ou 4. Dans un premier temps cette information permet au concepteur de choisir une solution technique ou organisationnelle de façon à éliminer les cas graves et très graves (Morales Aristizabal 2019).

Le tableau 1 présente les résultats pour les cas 1 (arrêt total de la ligne lors de la reconfiguration) et le tableau 2 pour le cas 2 (modification de la ligne avec production en parallèle) lors de la réalisation de deux pièces différentes puis de trois (fig. 3). Les valeurs dans le tableau indiquent la gravité potentielle des tâches pour trois types de volume d'influence et pour différentes étapes du planning de production. Les résultats obtenus permettent de voir les

étapes de la gamme de production plus dangereuses et les situations de risque potentielle.

Les figures 8 et 9 illustrent les résultats de cette analyse pour deux cas : énergie cinétique et énergie

| Temps | VI physique | VI cinétique | VI Potentielle |
|--------------|-------------|--------------|----------------|
| Cas 1 | | | |
| 70 | 1 | 1 | 2 |
| 90 | 1 | 2 | 2 |
| 110 | 1 | 2 | 2 |
| 130 | 0 | 4 | 3 |
| 150 | 1 | 0 | 1 |
| Cas 2 | | | |
| 70 | 1 | 1 | 2 |
| 90 | 2 | 4 | 2 |
| 110 | 3 | 4 | 2 |
| 130 | 0 | 4 | 3 |
| 150 | 1 | 2 | 1 |

Tableau 1 (Gomez Echeverri 2018)

| Body region | Specific body area | Quasi-static contact | | Transient contact | |
|---------------------------------|-------------------------|--|---|--|---|
| | | Maximum permissible pressure ^a P _s N/cm ² | Maximum permissible force ^b F _s N | Maximum permissible pressure multiplier ^c P _t | Maximum permissible force multiplier ^c F _t |
| Skull and forehead ^d | 1 Middle of forehead | 130 | 130 | not applicable | not applicable |
| | 2 Temple | 110 | | not applicable | |
| Face ^d | 3 Masticatory muscle | 110 | 65 | not applicable | not applicable |
| Neck | 4 Neck muscle | 140 | 150 | 2 | 2 |
| | 5 Seventh neck muscle | 210 | | 2 | |
| Back and shoulders | 6 Shoulder joint | 160 | | 2 | 2 |
| | 7 Fifth lumbar vertebra | 210 | 210 | 2 | 2 |
| Chest | 8 Sternum | 120 | | 2 | |
| | 9 Pectoral muscle | 170 | 140 | 2 | 2 |
| Abdomen | 10 Abdominal muscle | 140 | 110 | 2 | 2 |
| Pelvis | 11 Pelvic bone | 210 | 180 | 2 | 2 |
| Upper arm and elbow joints | 12 Deltoid muscle | 190 | | 2 | |
| | 13 Humerus | 220 | 150 | 2 | 2 |
| Lower arm and wrist joints | 14 Radial bone | 190 | | 2 | |
| | 15 Forearm muscle | 180 | 160 | 2 | 2 |
| | 16 Arm nerve | 180 | | 2 | |

VI - Cinétique

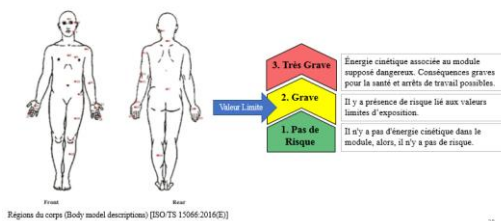


Figure 8 : Passage du tableau des limites biomécaniques à une échelle à trois niveaux

6 CONCLUSIONS

Des sauts technologiques significatifs sont induits par la mise en œuvre de l'usine du futur, les interactions entre l'Homme et les équipements de production sont modifiées afin de répondre aux objectifs de réactivité, de contrôlabilité, d'évolution de l'environnement de travail, ceci conduit pour la santé-sécurité au travail à de nouveaux enjeux tout au long du cycle de conception et d'exploitation du système par la maîtrise (identifier, évaluer, agir) de façon dynamique de la situation de travail (interaction système / opérateurs / organisation).

VI - Thermique

| Durée de contact (s) | Température | | | | |
|----------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|
| | 50-55 °C | 55-60 °C | 60-65 °C | 65-70 °C | 70-75 °C |
| 0-2 secondes | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 2-4 secondes | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 |
| 4-6 secondes | 1 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| 6-8 secondes | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 8-10 secondes | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 |

| | |
|-------------------------|--|
| 4. Très grave | Causes : brûlure troisième degré, conséquences graves pour la santé et dommages irréversibles. |
| 3. Grave | Causes : brûlure deuxième degré, dommages réversibles avec arrêt de travail prolongé. |
| 2. Important | Causes : seuil de brûlure, dommages réversibles avec arrêt de travail temporaire. |
| 1. Pas de risque | Causes : absence de brûlure, négligeable. |

Figure 9 : Passage du tableau des valeurs thermiques à une échelle à trois niveaux

Afin de répondre à ces objectifs nos travaux, réalisés dans un objectif de prévention intégrée ont portés à la fois sur l'identification de paramètres caractéristiques de situations dangereuses : flux d'énergie, volume d'influence associés aux risques potentiels définis dans les normes existantes pour l'ensemble des types d'énergie. Ces éléments sont mis en œuvre dans des outils de traitement d'informations hétérogènes et en interaction (CAO, bases de données, tableaux de liens) permettant de proposer et de valider des configurations spatiales et temporelles.

Une difficulté apparue lors de ces études a été d'adapter une échelle de gravité commune à tous les volumes d'influence, car les informations disponibles sur chaque type de risque ne sont pas les mêmes. Il serait pertinent d'utiliser une échelle de gravité plus large afin que le concepteur puisse proposer selon le niveau de gravité une solution optimale et efficace pour supprimer le risque tout en assurant une productivité et une qualité suffisante. De plus il serait intéressant d'affiner les données énergétiques à l'aide d'une échelle continue.

La démarche et les outils proposés ont été validés sur un cas simple, leurs mises en œuvre sur des cas industriels reste à entreprendre.

REMERCIEMENTS

Ce projet s'inscrit dans le cadre du laboratoire LC2S (Laboratoire mixte pour la conception sûre de situations de travail) soutenu par l'INRS et le LCFC / ENSAM dont l'objectif est de fournir aux concepteurs d'équipements de travail une démarche structurée et outillée pour passer de la conception de systèmes techniques à la conception des situations de travail pour concilier performance et prévention des risques professionnels.

REFERENCES

- AFNOR, 2008. NF EN 1005, Safety of machinery - Human physical performance
- AFNOR, 2010. NF EN ISO 12100 - Safety of machinery, General principles for design

- Benyoucef L. (Editor) 2019. Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation, Springer Series in Advanced Manufacturing,
- Borutsky 2009. *Bond graph methodology: development and analysis of multidisciplinary dynamic system model*, Springer Science & Business Media
- CEE 2012 : *Une industrie européenne plus forte au service de la croissance et de la relance économique*, Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen
- D'Acunto A., Martin P. (2009) "*Methodology of Reconfigurable Machine Tool: Structural and Architectural Designing Process*" 2nd IPROMS International Researchers Symposium., 22-24 July, 2009, Ischia, Italy
- De Galvez, N., 2016. Sécurité des machines : méthodologie d'identification systématique des phénomènes dangereux en conception (Spécialité Conception), soutenue le 12 Décembre 2016.
- De Galvez N, Marsot J., Martin P., Siadat A., Etienne A., 2017. A new approach to hazard identification during the design process by analysing energy transfers, *Safety Science*, Volume 95, p. 1-14
- EFFRA 2019: *Effra vision for a manufacturing partnership in Horizon Europe*, www.effra.eu
- FIM 2015, *Guide pratique de l'usine du futur, enjeux et panorama de solutions*, Fédération des Industries Mécaniques, www.industriedufutur.fim.net, (accès 16/01/2018)
- FUTURPROD, 2013 : *Les systèmes de production du futur*, Atelier de Réflexion Prospective de l'ANR, www.cluster-gospi.fr, (access 16/01/2018)
- Gomez Echeverri J. C., 2018, *Prise en compte dans la conception et l'exploitation des postes de travail de l'usine du futur des aspects sante – sécurité* », mémoire de master KIMP-CII, ENSAM
- INRS, 2017 Interventions à proximité des réseaux électriques aériens. Place des détecteurs de lignes électriques dans la démarche de prévention, ED6292.
- INRS, 2018a Dossier Bruit.
- INRS, 2018b Dossier Champs Électromagnétiques.
- INRS, 2018c Dossier Rayonnements Optiques.
- INRS, 2019. Dossier Rayonnements Ionisants.
- ISO/TS 15066:2016. Technical specification Robots et dispositifs robotiques — Robots coopératifs.
- Koren, Y., Moriwaki T. , Jovane F., Ulsoy G., Van Brussel, (1999) Reconfigurable Manufacturing Systems, *Annals of the CIRP*, 48/2, 527-540
- Morales Aristizabal J. H., 2019, *Quantification des risques dans la conception des systèmes de production reconfigurables*, mémoire de master KIMP-CII, ENSAM
- Veltz P., and Weil T. 2015. L'industrie, notre avenir, *La Fabrique de l'Industrie*,